高层住宅房建基坑支护施工技术与稳定性分析

杨炳光
广州花都城投铁工建设工程有限公司　广东　广州　510000

摘　要：高层住宅基坑开挖深、环境约束强，毗邻地铁时变形约束更刚性。本文梳理排桩内撑、地下连续墙等适用工况，分析地铁侧与非地铁侧差异化选型及隔离止水关键作用，剖析基坑—隧道变形耦合与分阶段控制要点，提出以地铁变形为优先约束、自动化监测与伺服调控为纽带的动态控制路径，供邻近工程参考。

关键词：基坑支护；深基坑；地铁保护；稳定性分析；变形监测；信息化施工

引言：高层住宅地下拓展基坑深度跨越多个含水层。毗邻运营地铁时，变形控制由“工程安全”收紧至“运营安全”，坑周沉降可转为道床差异沉降与轨道几何劣化。支护比选、精细施工与动态调控决定基坑稳定和地铁结构安全双重底线。本文围绕支护技术与稳定性保障两条线索，分析地铁侧特殊约束及应对路径。

1 高层住宅房建基坑支护的技术特点与选型逻辑

高层住宅基坑通常开挖至地下二层以上，深度多超过五米，平面展布广、坑边荷载复杂。支护结构既承担水土压力，又须约束坑周土体位移，避免邻近建筑物、管线与道路出现差异沉降。当坑边存在运营地铁结构时，选型的首要约束从“造价与工期”前移至“地铁结构附加变形是否处于允许区间”。按现行保护技术标准，轨道交通结构的累计沉降（或隆起）量与水平位移量一般不应大于10 mm，隧道水平直径收敛累计变化量亦按10 mm量级控制；当保护对象与基坑净距小于一倍开挖深度时，环境保护等级往往落入最高档，对应的围护结构最大侧移控制指标可低至1.4‰H量级。这意味着同一场地内，地铁侧与非地铁侧的支护刚度需求可能相差一个数量级。

选型须以分侧思维取代均一思维。放坡开挖与土钉墙在远离地铁侧仍可适用，但在保护区内则因坡面卸荷范围大、变形发展快而受到严格限制。排桩加内撑刚度大、变形易控，是地铁侧常用的基本体系；地下连续墙兼具挡土与止水功能，在紧邻运营隧道且地下水丰富的工况中更为适配。当轨道交通结构安全保护等级为A级或B级时，规范明确要求采用整体刚度较大的支护结构体系，软土地区尚需通过分坑控制单体基坑的平面尺寸与施工时序。支护结构与坑周土体属于共同工作的整体，地铁侧土体约束的强弱与结构刚度是否匹配，最终反映在隧道水平位移与道床沉降能否收敛于毫米级区间[1]。

2 高层住宅房建基坑常见支护结构形式与施工工艺

2.1 放坡开挖与土钉墙的适用边界收缩

放坡开挖依托坡面自稳与坡脚反压维持平衡，工艺简洁，但要求场地开阔、开挖深度有限。土钉墙通过逐层开挖、打入土钉并挂网喷射混凝土，将坑壁土体联结为整体。此类工法在非地铁侧仍可作为经济方案，但在毗邻地铁站的工况中，其适用性受到两方面挤压：其一，土钉墙的变形具有渐进累积特征，坑壁位移往往在开挖结束后仍持续发展，与地铁保护要求的“尽早收敛”相悖；其二，土钉钻孔与注浆对邻近土体产生扰动，在运营隧道旁侧可能诱发附加位移。若确需在过渡区段采用，须以更密的分层开挖步距、更短的土体暴露时间和加密的位移监测为前提，且不宜作为紧邻保护区一侧的主导支护形式。

2.2 排桩内撑与锚索的差异化适用

排桩支护以钻孔灌注桩或预制桩沿坑边布置，冠梁将各桩连系为整体，桩体抗弯刚度大，但独立成桩时位移偏大，须借助内支撑或锚索提供水平约束。内支撑体系刚度高、变形控制能力强，是地铁侧排桩体系的首选搭配。钢筋混凝土支撑整体性好，钢支撑拆装快并可施加预应力，在邻近地铁的工程中，轴力补偿钢支撑的应用尤为关键：通过伺服系统对支撑轴力进行主动调节，可在开挖过程中实时补偿因土体卸荷引起的支撑松弛，将围护墙变形压在更低的水平。支撑的架设时机、预应力施加与拆除顺序须与开挖工况严格对应，“先撑后挖”不可动摇；换撑阶段尤须待新支撑形成有效受力后方可拆除旧撑，否则应力重分布可能引发位移突增。

锚索支护在场地具备可靠锚固土层时可省去坑内支撑，为土方开挖让出作业空间。但在地铁保护区一侧，锚索的长期预应力损失与锚固段地层变异性构成额外风险，且锚索穿越隧道周边地层时可能形成渗流通道，故其应用须经专项论证，不宜在紧邻保护对象的区段作为主受力体系[2]。

2.3 地下连续墙与SMW工法桩：地铁侧的主力选项

地下连续墙经成槽、吊放钢筋笼、水下灌注混凝土形成连续墙体，刚度大、整体性好，兼作挡土与止水结构。在紧邻运营地铁的深基坑中，地下连续墙的刚度优势使其成为控制隧道水平位移的首选围护形式。成槽阶段的泥浆护壁、墙幅接头质量与钢筋笼吊装精度是质量控制的核心；接头缺陷不仅削弱挡土连续性，更会形成渗漏薄弱点，而坑内降水一旦通过接头绕渗，将持续抽取坑外地下水，诱发地铁侧地层固结沉降。当地铁侧环境保护等级较高时，尚应在围护墙与保护对象之间设置隔离桩或隔离墙，以隔断基坑开挖与降水产生的应力传递路径，将附加变形截断在保护对象之外。

SMW工法桩将型钢插入水泥土搅拌桩内，借水泥土挡水、型钢受弯，施工速度快、型钢可回收。其在软土地区非地铁侧仍具造价与工期优势，但用于地铁侧时须审慎评估两个薄弱环节：水泥土搅拌桩施工本身对邻近隧道存在挤土或扰动效应，且型钢拔除后的空隙若处理不当，可能形成新的渗流通道。因此，SMW工法桩更宜布置在远离保护对象的区段，地铁侧则优先采用刚度与止水连续性更具保障的地下连续墙体系。

2.4 地铁侧施工的关键控制点

除一般性的垂直度、接头质量与浇筑密实度控制外，地铁侧施工须额外落实三项约束。其一，止水帷幕应做成落底式，切断坑内外水力联系，避免坑内降水持续牵动坑外水位。其二，紧邻保护对象侧的施工顺序应遵循“隔离桩→隔水帷幕→槽壁加固→围护墙→坑内加固”的递进逻辑，先形成隔离屏障，再进行主受力结构的施工。其三，分坑筹划应将靠近地铁侧的单坑规模压缩，采用“远离地铁侧大坑先挖、紧邻地铁侧条坑后挖”的顺序，利用时空效应削减单次卸荷对隧道的叠加扰动。

3 高层住宅房建基坑稳定性分析与变形控制

3.1 基坑失稳模式在邻近地铁条件下的特殊表现

常规基坑失稳表现为整体滑移、坑底隆起、支护倾覆与渗流破坏。当地铁结构位于影响范围内时，上述每一种失稳模式都获得了一个额外的“传导出口”：坑壁位移与坑底隆起不再仅是基坑自身的变形，而是通过地层传递为隧道的侧向位移、收敛变形与道床沉降。整体滑移若朝向地铁侧发展，隧道将从“被动承受附加位移”转为“直接承受土体推挤”，后果远超一般坑周沉降。渗流破坏的危害亦被放大：坑内降水形成的降落漏斗一旦波及隧道周边，软土固结沉降将使道床产生难以逆转的差异变形。

更值得关注的是变形发展的阶段性权重。全过程实测研究表明，围护结构与基坑开挖施工间隙产生的道床沉降量可占总道床沉降量的70%以上，隧道水平位移在围护结构施工阶段增加最为突出，而隧道收敛则在基坑开挖阶段增量最大。这一规律意味着，地铁保护不能等到开挖阶段才启动，围护施工阶段的成槽、搅拌与土体加固同样构成关键的扰动源，控制窗口须前移[3]。

3.2 稳定性分析的核心内容与地铁侧参数取值

稳定性分析仍围绕抗倾覆、抗滑移、抗隆起与渗流稳定展开，但地铁侧的安全储备须系统性抬升。以抗隆起为例，软土地区邻近轨道交通结构的基坑，围护墙底端抗隆起安全系数按保护等级A级、B级、C级分别不应低于2.2、2.0与1.8，高于一般工况的常规范畴。插入深度的增加同时改善抗倾覆与抗隆起状态，但会延长成槽或打桩的施工时间、增大扰动窗口，须在“结构安全储备”与“施工扰动控制”之间寻找平衡点，而非简单压着规范下限取值。

地铁侧的稳定性分析还须将隧道结构作为独立的校核对象。围护墙最大侧移的控制指标不能止于坑周地表沉降的允许值，而应以隧道附加变形的承受能力反算。统计资料表明，邻近地铁且净距较近的基坑，围护结构平均最大侧移约为0.14%H，最大地表沉降约为侧移的80%，该量级可作为地铁侧变形控制的参考基准。分析模型应反映隔离桩对应力传递的截断效应、坑内加固对被动区抗力的抬升以及分坑空间效应对角部约束的增强，计算给出的安全系数与变形预估值须经监测数据持续校核，才能作为动态调整的依据。

3.3 地下水控制：地铁侧的首要稳定性变量

地下水是影响基坑稳定性的核心变量，在地铁侧其权重进一步上升。水位变化直接改变土体有效应力，进而影响支护结构承受的水土压力与坑底抗隆起能力；更关键的是，坑内外水头差驱动的渗流一旦穿越隧道周边地层，细颗粒流失与固结沉降将同时作用于隧道结构。因此，地铁侧的地下水控制不是单纯的“排水”问题，而是一个以“隔断水力联系”为前提、以“水位动态平衡”为目标的约束系统。

落底式截水帷幕是隔断坑内外水力联系的第一道屏障，其插入深度须进入相对隔水层足够厚度，否则绕渗不可避免。在保护区内，坑外降水原则上应予禁止；坑内降水须配合回灌措施，将坑外水位变幅控制在允许区间，避免因降水引发地铁侧地层压密。降水速率须与开挖速率匹配：降水过快导致坑外沉降陡增，过慢则坑内积水软化土体，两者均不利于隧道变形控制。对于存在承压水层的工况，坑底突涌风险须单独评估，开挖至承

压顶板附近时更须警惕水头压力击穿隔水层，预留抗突涌验算并配合减压降水[4]。

3.4 监测体系：从“基坑监测”扩展为“基坑—隧道联合监测”

常规基坑监测以围护结构位移、支撑轴力与坑周沉降为核心。毗邻地铁站时，监测对象须明确扩展至隧道结构本身：道床沉降、隧道水平位移、水平收敛以及隧道与车站接缝处的差异沉降，均应纳入必测项目。测点布设应覆盖靠近基坑侧的隧道环段，并在分坑交界、后挖区块对应的隧道范围加密测点。监测频率须与施工阶段匹配：围护施工阶段即应启动隧道变形监测，而非等到开挖才布点；开挖至隧道埋深附近、封底与换撑阶段应提高频次。

监测数据的判读应超越单点阈值思维。地铁结构的变形往往呈现“缓慢累积—局部加速—整体响应”的演化路径，位移速率的持续上升、道床差异沉降的增大以及支撑轴力的异常松弛，其预警价值高于某一测点的瞬时绝对值。自动化监测与伺服调控的联动是近年来的重要进展：将隧道位移与支撑轴力实时数据接入控制系统，当变形趋近预警区间时自动调节伺服支撑轴力或启动回灌井，可在不停工的前提下将扰动拉回可控范围。工程实践表明，在超深基坑紧邻运营隧道的条件下，以自动化监测驱动伺服支撑与回灌的协同调控，可将隧道位移控制在毫米级。预警阈值须按保护等级与隧道初始状态分别厘定，并预留分级响应空间；数据链的完整性与相邻测点的相互印证，是避免误判与漏判的基础。

3.5 稳定性控制的分阶段动态路径

地铁侧基坑的稳定性控制应分解为围护施工、开挖与换撑、结构回筑三个阶段，各阶段的控制重心不同。围护施工阶段以“减扰动”为核心：成槽或搅拌施工的速度、泥浆参数与槽壁加固质量直接决定隧道水平位移的初始增量，隔离桩应在此阶段前形成有效屏障。开挖与换撑阶段以“控卸荷”为核心：分坑顺序、分层分块尺寸、支撑预加轴力与开挖暴露时间构成主要调控变量，轴力补偿支撑的主动调节能力在此阶段发挥最大效用；换撑时须确保新支撑传力可靠，避免应力集中引发位移回弹。结构回筑阶段以“保收敛”为核心：底板与地下结构尽早形成刚度，围护与主体结构之间的空隙及时回填密实，支撑拆除宜采用静力措施，减少对已趋稳定变形的二次扰动。

稳定性控制的本质是动态迭代而非一次设计。地铁侧与非地铁侧的监测数据应分别研判、联动决策：当地铁侧隧道变形逼近控制值时，可通过调整远离侧的开挖节奏为地铁侧争取应力调整时间。应急预案须明确地铁侧的专项处置手段，包括坑内局部回填反压、伺服支撑轴力紧急补偿与回灌系统启动条件，并将运营单位的联动响应纳入流程。唯有将设计约束、施工时序与监测反馈紧密耦合，才能在高环境敏感度条件下同时守住基坑安全与地铁运营安全两条底线[5]。

结束语：毗邻地铁站的高层住宅基坑，支护选型与稳定性分析的核心变化在于控制尺度收紧、控制窗口前移。地铁侧支护以整体刚度和止水连续性为先，施工以分阶段减扰动为纲，监测以隧道变形为优先判据；科学选型划定安全边界，三者构成深基坑管控的闭合链条。

参考文献

[1]史晓瑶.深基坑支护技术在高层建筑中的应用与稳定性分析[J].散装水泥,2026,(7):136-138.

[2]刘金锋,陈高平.高层建筑施工中深基坑支护结构的稳定性问题研究[J].奥秘,2026,(13):72-74.

[3]黄小伟.城市密集区高层建筑深基坑支护稳定性控制技术及变形监测[J/OL].中文科技期刊数据库（引文版）工程技术,2026,(6):138-141.

[4]张毓秋,弓毅超.有限元法分析高层建筑深基坑支护稳定性[J].砖瓦,2026,(3):49-50+54.

[5]李小茉.高层住宅建筑工程中深基坑土钉墙支护施工技术的应用探析[J/OL].中文科技期刊数据库（文摘版）工程技术,2026,(2):037-040.